

حذف آنتی بیوتیک و نکومایسین با استفاده از روش فتوکاتالیستی

فاطمه دهقانی

دکتری مهندسی محیط زیست، اداره HSE، دانشگاه علوم پزشکی شیراز

خلاصه

آنتی بیوتیک ها در آب های سطحی، زیرزمینی، تصفیه خانه های فاضلاب و حتی آب آشامیدنی شناسایی شده اند. یکی از رایج ترین روش های از بین بردن آنتی بیوتیک ها در محیط های آبی، اکسیداسیون پیشرفته است. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تجزیه و نکومایسین توسط دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) - کلینوپتیلولیت و بهینه سازی آن با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. و نکومایسین از طریق کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا اندازه گیری شد. علاوه بر این، روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی رابطه بین تخریب و نکومایسین و متغیرهای مستقل از جمله pH، غلظت و نکومایسین، غلظت کاتالیست، دما و زمان استفاده شد. اعتبار و کفایت مدل با آمارهای مربوطه تایید شد (ضریب همبستگی $R^2 = 0.98$). راندمان تخریب و نکومایسین در شرایط بهینه ۹۷٪ بود (pH معادل ۵، غلظت و نکومایسین معادل ۳۰ میلی گرم در لیتر، محتوای TiO_2 - کلینوپتیلولیت معادل ۵۰،۲ میلی گرم در راکتور ۲۵۰ میلی لیتر، دما معادل ۳۲،۲۴ درجه سانتیگراد، و زمان واکنش معادل ۵۰،۹ دقیقه). نتایج نشان داد که استفاده از کاتالیست دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) - کلینوپتیلولیت می تواند خواص فتوکاتالیستی را افزایش و میزان تخریب و نکومایسین قابل قبولی ایجاد نماید.

کلمات کلیدی: تجزیه آنتی بیوتیک، و نکومایسین، کلینوپتیلولیت، دی اکسید تیتانیوم، طراحی مرکب مرکزی

مقدمه

استفاده از آنتی بیوتیک ها به طور قابل توجهی در سراسر جهان افزایش یافته است. Bayan و همکاران توضیح داد که استفاده از آنتی بیوتیک ها به دنبال بیماری کروناویروس (COVID-19) افزایش یافته است [۱]. این مواد از مسیرهای مختلفی مانند فاضلاب صنایع داروسازی، فاضلاب بیمارستانی و فضولات انسان و حیوان وارد محیط می شوند [۲]. تصفیه خانه های فاضلاب به عنوان منبع اصلی ورود آنتی بیوتیک ها به محیط زیست شناسایی شده اند [۳]. این آلاینده ها، متابولیت های آن ها و محصولات تخریب شده آن ها می توانند از طریق مهاجرت یا تجمع بر محیط زیست و سلامت انسان تأثیر منفی بگذارند [۴]. عوارض جانبی عبارتند از تهوع، استفراغ، بثورات پوستی و کولیت همراه با آنتی بیوتیک ها [۵]. از آنجایی که آنتی بیوتیک ها پس از مصرف به طور کامل در بدن متابولیزه نمی شوند، حدود ۳۰ تا ۹۰ درصد از ۳۰۰۰۰۰ تن آنتی بیوتیک در جهان پس از دفع فعال باقی می ماند. بنابراین، بسیاری از آنتی بیوتیک های فعال سالانه در محیط پراکنده می شوند [۶]. مقدار آنتی بیوتیک از ng/L در آب های سطحی تا میکروگرم در لیتر در تصفیه خانه های فاضلاب و پساب های بیمارستانی گزارش شده است. این مقدار در فاضلاب دارویی می تواند به میلی گرم در لیتر برسد [۷].

و نکومایسین رایج ترین آنتی بیوتیک گلیکوپپتیدی در بین سایر آنتی بیوتیک ها است. از آن به عنوان آخرین خط دفاعی در برابر بیماری های جدی مانند اندوکاردیت، ذات الریه و مننژیت استفاده می شود [۸]، [۹]. استفاده از و نکومایسین در بیمارستان های آلمان به ویژه در مناطق جنوبی این کشور افزایش یافته است. در نتیجه، مقاومت به و نکومایسین از ۱۱،۲ درصد در سال ۲۰۱۴ به ۲۶،۱ درصد در سال ۲۰۱۷ افزایش یافت [۱۰]. علاوه بر این، غلظت و نکومایسین در رودخانه های فرانسه ۹ نانوگرم در لیتر بود [۴]. این مقدار در پساب های تصفیه شده بیمارستان های فرانسه ۱،۶ و ۳۷،۳ میکروگرم در لیتر بود. طبق گزارش Laverman، راندمان حذف و نکومایسین در طی فرآیندهای تصفیه لجن فعال و UV به ترتیب ۵۲ و ۲۸ درصد بود [۷]. علاوه بر این، Qiu و همکاران، بیشترین غلظت و نکومایسین در کارخانه های داروسازی چین $5/97 \pm 54/90$ میلی گرم در لیتر و $3/60 \pm 46/32$ میلی گرم در لیتر، در ورودی تصفیه خانه ها و $0/50 \pm 0/04$ میلی گرم در لیتر و $0/24 \pm 0/04$ میلی گرم در لیتر در پساب نهایی بود. [۱۱]. و نکومایسین، به عنوان یک آنتی بیوتیک، ممکن است دارای سمیت حاد یا مزمن برای باکتری ها، جلبک ها، بی مهرگان و ماهی ها در محیط آبی باشد [۴]. تعداد زیادی از آنتی بیوتیک ها تجزیه ناپذیر هستند و می توانند برای مدت طولانی در محیط های آبی زنده بمانند [۱۲]. تصفیه خانه فاضلاب در حذف آنتی بیوتیک ها بی تأثیر است و مطالعاتی وجود دارد که نتایج تجربی آنها حاکی از محدودیت روش های تصفیه در تجزیه محصولات دارویی است. دلایل ذکر شده نشان می دهد که روش های تصفیه جدیدی برای حذف آنتی بیوتیک ها از محیط های آبی مختلف مورد نیاز است [۱۳]. در نتیجه تمایل به روشی که این گونه مواد را به مواد غیر سمی تبدیل می کند افزایش یافته است [۴].

در میان روش‌های تصفیه فاضلاب، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) می‌توانند ترکیبات آلی را توسط رادیکال‌های هیدروکسیل تحت اشعه UV یا نور مرئی در تصفیه آب و فاضلاب تجزیه کنند [۱۵]. AOP ها را می‌توان به سیستم‌های ناهمگن و همگن تقسیم کرد [۱۶]. کاتالیزور مورد استفاده در فرآیندهای ناهمگن یک ماده نیمه رسانا است [۱۷]. نیمه هادی‌هایی مانند فوتوکاتالیز ناهمگن مبتنی بر دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) به طور گسترده برای تجزیه آنتی‌بیوتیک از محیط‌های آبی استفاده می‌شود. استفاده از اشعه ماوراء بنفش یا نور مرئی با یک نیمه هادی باعث ایجاد جفت الکترون و حفره (e/h) به ترتیب در باندهای هدایت (CB) و والانس (VB) نیمه هادی می‌شود. الکترون‌های تولید شده (e^-) می‌توانند اکسیژن محلول را کاهش دهند تا رادیکال‌های سوپراکسید تولید کنند. در مقابل، سوراخ‌ها (h^+) می‌توانند مولکول‌های آب یا آنیون‌های هیدروکسیل را برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل اکسید کنند. این رادیکال‌های واکنش‌گر قدرتمند می‌توانند سپس به آلاینده‌های آلی حمله کنند، آن‌ها را به قطعات کوچک‌تر بشکنند و در نهایت به آب یا دی‌اکسید کربن تبدیل کنند [۶]. TiO_2 به طور گسترده به عنوان یک فوتوکاتالیست در تصفیه فاضلاب مواد دارویی استفاده می‌شود. دارای فعالیت فوتوکاتالیستی عالی، در دسترس بودن گسترده، غیرسمی بودن و نسبت سطح به حجم بالا است [۱۵]، [۱۸]. TiO_2 به عنوان یک نیمه هادی دارای شکاف انرژی بزرگ (۳٫۲ eV) است. همچنین دارای پایداری شیمیایی در شرایط عملیاتی و ظرفیت اکسیداسیون بسیار بالای سوراخ‌های ایجاد شده بر روی پیوند ظرفیت است. بنابراین، به طور گسترده‌ای به عنوان ماده اصلی راکتورهای فوتوکاتالیستی استفاده می‌شود [۶]، [۱۹]. اما، تجزیه نوری ترکیبات آلی با TiO_2 به دلیل سرعت کم انتقال الکترون به اکسیژن محدود است [۲۰]، [۲۱]. همچنین، ترکیب مجدد e^-/h^+ تولید شده توسط TiO_2 محدود شده است. عملکرد آن در آزمایش‌های تجزیه نوری و فعالیت فوتوکاتالیستی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که هزینه روش را افزایش می‌دهد [۲۲]، [۲۳]. علاوه بر این، دارای یک ناحیه فوتوکاتالیستی باریک (> 400 نانومتر) است که می‌تواند تنها بخش کوچکی از نور خورشید را جذب کند، ۲ تا ۳٪ جذب ضعیف، مساحت سطح کم، ترکیب مجدد سریع جفت الکترون-حفره، و مشکل در جداسازی محلول منجر به محدودیت‌های قابل توجهی در استفاده از TiO_2 از محلول می‌شود [۲۴]، [۲۵]. از سوی دیگر، رادیکال‌های هیدروکسیل عمر کوتاهی دارند (چند نانوثانیه). در نتیجه باید بلافاصله پس از تولید واکنش نشان دهند. پراکندگی ذرات TiO_2 روی کلینوپتیلولیت، سطح بزرگتری نسبت به TiO_2 به تنهایی ایجاد می‌کند [۲۱]، [۲۶]. اکبری و همکاران. نشان داد که پراکندگی ذرات TiO_2 روی کلینوپتیلولیت فعالیت کاتالیزوری را بین ۱۲ تا ۵۷ درصد افزایش داد [۲۶].

در دهه‌های اخیر، پشتیبانی از نیمه هادی‌ها بر روی بسترهای مختلف، کارایی فوتوکاتالیستی آنها را افزایش داده است. زئولیت‌ها به دلیل منافذ یکنواخت منحصر به فرد و کانال‌های مستقیم خود در بین تکیه‌گاه‌های مختلف مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند [۲۷]، [۲۸]. در بین زئولیت‌ها، کلینوپتیلولیت طبیعی مقرون به صرفه‌تر و سازگارتر با محیط زیست است. این زئولیت به دلیل ساختار منحصر به فرد، منافذ یکنواخت، قیمت پایین، خلوص بالا، ظرفیت تبادل یونی بالا، چگالی کم، مساحت سطح زیاد، درجه بلورینگی بالا، توانایی جذب مولکول‌ها و یون‌ها و همچنین در دسترس بودن در ایران در مطالعه حاضر مورد توجه قرار گرفته است [۲۷]، [۲۹]، [۳۱]. ظرفیت جذب این زئولیت، مولکول‌های آلاینده آلی را در نزدیکی سطح کاتالیزور، جایی که رادیکال هیدروکسیل تولید می‌شود، قرار می‌دهد. در نتیجه راندمان تخریب نوری افزایش می‌یابد. مزیت دیگر زئولیت این است که از تراکم TiO_2 در فرآیندهای فوتوکاتالیستی ناهمگن جلوگیری می‌کند که باعث افزایش سطح موثر نیمه هادی (TiO_2) می‌شود. زئولیت همچنین دارای میدان الکتریکی قوی است که از ترکیب مجدد جفت‌های الکترون/حفره از طریق توزیع الکترون‌های تولید شده در ماده جلوگیری می‌کند. بنابراین در مقایسه با سایر حامل‌ها فعالیت بیشتری نشان می‌دهد [۲۹]. تاکنون بیش از ۱۰۰ نوع زئولیت در طبیعت یافت شده است. کلینوپتیلولیت برای بدن سمی نیست و بدون جذب از کل دستگاه گوارش عبور می‌کند. این ماده در شرایط مختلف محیطی پایدار است و دمای بالای ۴۵۰۰ درجه سانتیگراد را تحمل می‌کند. همچنین در برابر شرایط قلیایی و اسیدی بدون هیچ‌گونه تخریب مقاوم است [۳۲].

با این حال، هیچ مطالعه‌ای برای ارزیابی اثر ترکیب TiO_2 -کلینوپتیلولیت بر تخریب وانکومایسین انجام نشده است. بنابراین، مطالعه حاضر به منظور سنتز یک کامپوزیت با پوشش TiO_2 بر روی سطح زئولیت به عنوان یک ماده ارزان قیمت برای افزایش راندمان تخریب وانکومایسین انجام شد. روش سطح پاسخ (RSM) یک روش ریاضی و آماری برای به دست آوردن شرایط بهینه برای یک سیستم چند متغیره است. این با موفقیت در فرآیندهای فوتوکاتالیستی مختلف برای دستیابی به بهینه‌سازی آن با استفاده از طرح‌های تجربی استفاده شده است. RSM یک استراتژی خوب است که عملکرد فرآیند را بهبود می‌بخشد و کارایی سیستم را بدون افزایش هزینه‌های مرتبط افزایش می‌دهد [۳۳]. در این مطالعه، برای اولین بار، RSM بر اساس طراحی مرکب مرکزی (CCD) به منظور تعیین شرایط بهینه برای تجزیه وانکومایسین توسط نانوکامپوزیت TiO_2 -کلینوپتیلولیت تحت نور UV مورد استفاده قرار گرفت.

روش کار :

متغیرهای مستقل مورد استفاده در آزمایش‌ها به شرح زیر بود: Ph معادل ۳-۱۱، زمان واکنش: ۱۵-۷۵ دقیقه، دما: ۲۵-۴۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت وانکومایسین: ۱۵-۷۵ میلی‌گرم در لیتر، و کاتالیست TiO_2 -کلینوپتیلولیت: ۲۵-۱۲۵ میلی‌گرم در راکتور ۲۵۰ میلی‌لیتری. واکنش‌های تخریب فوتوکاتالیستی در یک راکتور ۲۵۰ میلی‌لیتری مجهز به شیکر انجام شد. منبع نور یک لامپ UV-C ۶ وات با طول موج ۲۵۴ نانومتر ساخت فرانسه بود که در یک لوله کوآرتز (۳۰ سانتی‌متر طول و ۵ سانتی‌متر قطر) قرار داشت و در محلول برای تابش بهتر در مرکز غوطه‌ور بود. از یک دماسنج برای تنظیم دما در راکتور استفاده شد و pH نمونه‌ها با اسید هیدروکلریک ۰.۱٪ و هیدروکسید سدیم ۱٪ تنظیم شد. کل سیستم برای جلوگیری از انعکاس در فویل آلومینیومی پیچیده شده بود. در طول هر فرآیند، نمونه‌ها در فواصل ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ دقیقه‌ای از راکتور گرفته شد. ذرات کاتالیزور از طریق سانتریفیوژ از محلول جدا شدند. در نهایت مقدار وانکومایسین باقیمانده توسط کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) اندازه‌گیری شد.

درصد تجزیه وانکومایسین (%R) با استفاده از معادله محاسبه شد. (۱).

$$(1) \quad R\% = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100$$

C_{out} و C_{in} نشان دهنده غلظت وانکومایسین (mg/L) قبل و بعد از فرآیند TiO_2 -clinoptilolite/UV بودند.

یافته‌ها:

اثرات شرایط عملیاتی مختلف بر میزان تخریب وانکومایسین

اثر pH

pH یک پارامتر قابل توجه در فرآیندهای فوتوکاتالیستی است که بر تخریب ترکیبات آلی تأثیر می‌گذارد [۳۳]-[۳۴]. خواص فوتوکاتالیستی مانند بار سطحی [۳۵]، اندازه ذرات و تجمع ذرات به شدت تحت تأثیر pH محلول قرار دارند [۳۶]. دانستن بارهای انباشته شده روی سطح کاتالیزور یا جاذب به ما کمک می‌کند تا اسیدیته محلول را برای رسیدن به بهترین سیگنال بهینه کنیم. فرآیند تخریب نوری بر روی سطح کاتالیزور انجام می‌شود. سپس، بار سطحی کاتالیزور و pH محلول اطراف نقش اساسی در بازده کاتالیزوری دارند. بنابراین، TiO_2 -pH_{pzc}-کلینوپتیلولیت تعیین شد. به طور کلی، قبل از pH_{pzc} (بار نقطه صفر)، سطح کاتالیزور دارای بار منفی است که می‌تواند پروتون‌های تولید شده در فرآیند تجزیه آب را از محلول اطراف کاتالیزور جذب کند. به دلیل وجود آنیون‌های هیدروکسید در محلول مجاور، pH آن افزایش می‌یابد. و سطح کاتالیزور بار مثبت دریافت می‌کند. طبق مطالعه رضایی و همکاران، زمانی که $\text{pH}_s > \text{pH}_{pzc}$ ، سطح کاتالیزور دارای بار مثبتی است که آنیون‌های هیدروکسید آب را جذب می‌کند. این فرآیند منجر به دریافت بار منفی خالص توسط سطح کاتالیزور و کاهش pH محلول در تماس می‌شود [۳۷].

pH_{pzc} برای TiO_2 -کلینوپتیلولیت ۶.۵ به دست آمد. در مقادیر pH کمتر از ۶.۵، TiO_2 -clinoptilolite دارای بار مثبت است که باعث می‌شود وانکومایسین راندمان تخریب بالاتری داشته باشد. در مقابل، کاتالیزور TiO_2 -کلینوپتیلولیت در مقادیر pH بالاتر دارای بار منفی می‌شود. اگرچه رادیکال‌های هیدروکسید می‌توانند تشکیل شوند، اما بدون داشتن فرصتی برای واکنش و تخریب مولکول‌های وانکومایسین از بین می‌روند. بنابراین، راندمان حذف وانکومایسین با افزایش مقادیر pH کاهش می‌یابد.

این نتایج با مطالعه پترلا و همکاران مطابقت داشت. [۳۸]. مهرآبادی و همکاران نشان داد که وقتی نیروی دافعه بین سطح کاتالیزور (بار منفی) و الکترون‌های آزاد (بارهای منفی) در $\text{pH} > \text{pH}_{pzc}$ افزایش می‌یابد، کاهش در سرعت تخریب فوتوکاتالیستی آلاینده و جذب مشاهده شد [۳۹]. از آنجایی که بار سطحی کاتالیزور به شدت به pH محلول بستگی دارد، تأثیر pH بر سرعت تخریب نوری در محدوده 3-11 pH مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج برهمکنش بین TiO_2 -کلینوپتیلولیت و pH محلول در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، افزایش مقدار کاتالیزور و pH باعث افزایش سطح پیک و کاهش راندمان تخریب وانکومایسین می‌شود. بین مساحت پیک و بازده تخریب رابطه معکوس وجود دارد. به عبارت دیگر، هر چه سطح پیک بیشتر باشد، بازده تخریب کمتر خواهد بود. مطابق شکل ۵ (الف) در pH حدود ۵، ناحیه پیک کمترین مقدار است، به این معنی که راندمان تخریب حداکثر مقدار در pH 5 است.

Liu نشان داد که میزان حذف سولفادیاژین توسط TiO_2 -ژئولیت ابتدا افزایش و سپس در pH بین ۲ تا ۱۲ کاهش یافت. حداکثر حذف در pH 7.93.31 درصد بود [۴۰]. [۴۰]. ملکوئیان و همکاران نشان داد که راندمان حذف سیپروفلوکساسین توسط TiO_2 /۸۱

۹۲٪ درصد در pH معادل ۵ بود [۴۱]. به همین ترتیب، غفار و همکاران گزارش شده است. تخریب فنل ۹۷٪ در pH اسیدی معادل ۲-۱۰۰٪ در pH طبیعی و ۸۰٪ در pH ۹-۱۲ بود [۴۸]. پترسون و همکاران همچنین بیشترین تخریب پنی سیلین توسط TiO_2 را در pH ۴ و ۶ نشان داد [۴۲]. همانطور که گفته شد، تجزیه وانکومایسین در شرایط اسیدی بهتر انجام شد که با مطالعات فوق مطابقت دارد.

اثر میزان کاتالیست

غلظت کاتالیزور پارامتر مهمی است که به شدت بر تخریب آلاینده های آلی تأثیر می گذارد [۳۵]. اثر کاتالیزور TiO_2 -کلینوپتیلولیت بر تجزیه نوری وانکومایسین با تغییر دوز کاتالیزور از ۲۵-۱۲۵ میلی گرم در ۲۵۰ میلی لیتر از راکتور مورد مطالعه قرار گرفت. شکل (۱) (b) برهمکنش بین کاتالیزور و دما را نشان می دهد. با افزایش دما و کاتالیزور، پیک افزایش می یابد و راندمان تخریب وانکومایسین کاهش می یابد. همانطور که در شکل ۱ (a) و (b) نشان داده شده است، مقدار کاتالیزور کمتر از ۵۰ و بیش از ۱۰۰ میلی گرم در یک راکتور ۲۵۰ میلی لیتری تأثیر کمی بر راندمان تخریب وانکومایسین دارد. در محدوده ۵۰-۶۰ میلی گرم کاتالیزور در یک راکتور ۲۵۰ میلی لیتری، مکان های کاتالیزور فعال کافی وجود دارد و هیچ تجمعی برای ذرات آن رخ نداده است [۴۳]. مقدار بیش از حد کاتالیزور راندمان تخریب فوتوکاتالیست را کاهش می دهد زیرا کاتالیزور شدید منجر به کدورت سوسپانسیون، کاهش نفوذ اشعه ماوراء بنفش و کاهش تعداد مکان های فعال به دلیل تجمع ذرات می شود [۳۵]، [۴۴]، [۴۵].

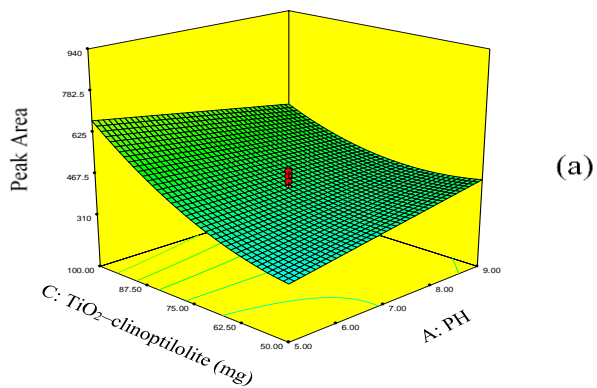
اثر دما

دمای بین ۲۹۳ تا ۳۵۳ کلوین (Kelvin) گزارش شده است که تأثیر ضعیفی بر سرعت اکسیداسیون و اکشن های فوتوکاتالیستی دارد. انرژی فعال سازی ظاهری در دماهای پایین تر (بین ۲۳۳ تا ۲۷۳ کلوین) افزایش می یابد در حالی که در دمای بالای ۳۵۳ کلوین منفی می شود. با این حال، انرژی های فعال سازی گزارش شده برای واکنش های فوتوکاتالیستی کمتر از انرژی های اندازه گیری شده برای واکنش های فوتوکاتالیستی است. بیان شده است که واکنش های رادیکال هیدروکسیل عمدتاً به انرژی فعال سازی واکنش های فوتوکاتالیستی کمک می کنند. علاوه بر این، بیان شد که افزایش دما باعث بهبود انتقال الکترون سطحی به دلیل تغییرات کوچک در سطح نیمه هادی می شود. بر اساس این نتایج، اغلب گزارش می شود که تغییرات جزئی دما بر فعالیت فوتوکاتالیستی تأثیر نمی گذارد [۴۵]، [۴۶]. Roushenas و همکاران بیان کرد که دمای بالای ۸۰ درجه سانتیگراد یک عامل محدود کننده برای جذب واکنش دهنده خواهد بود و انرژی فعال سازی ظاهری منفی می شود. می توان گفت که افزایش سرعت تخریب عکس با افزایش دما و واکنش در محدوده دمایی بین ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد است [۴۷]. Barakat و همکاران دمای بهینه ۲۵ درجه سانتیگراد و ۵۵ درجه سانتیگراد برای تجزیه نوری رنگ توسط نانو الیاف و نانو ذرات TiO_2 آغشته به نقره بود. آنها همچنین رابطه معکوس بین تخریب نوری و دما برای نانو الیاف را نشان دادند. بر اساس نتایج، افزایش دما منجر به افزایش انرژی جنبشی مولکول های رنگ شد که باعث فرار آن ها از نواحی فعال اطراف نانو الیاف و کاهش راندمان تخریب نوری شد [۴۸]. همانطور که در شکل (۱) (b) نشان داده شده است، افزایش دما و محتوای کاتالیزور باعث افزایش سطح پیک و کاهش راندمان حذف وانکومایسین شد. شکل (۱) قسمت (b) و (c) نشان می دهد که دمای حدود ۳۰-۳۳ درجه سانتیگراد بهترین دما برای تجزیه وانکومایسین است و دمای کمتر و بالاتر از این مقدار تأثیر کمی بر راندمان تجزیه وانکومایسین دارد.

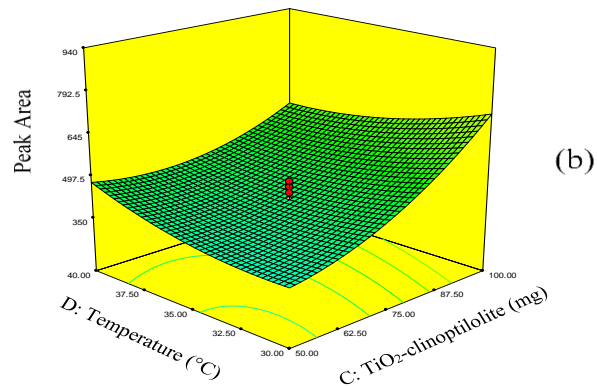
اثر زمان واکنش

در مطالعه حاضر، زمان واکنش برای تجزیه وانکومایسین ۱۵-۷۵ دقیقه بود. برهمکنش زمان واکنش و دما در شکل ۱ (c) ارائه شده است. بر این اساس، با افزایش زمان واکنش از ۱۵ به ۷۵ دقیقه، سطح پیک کاهش و راندمان تخریب افزایش یافت. بهترین تخریب در دمای کمتر از ۳۵ درجه سانتیگراد در ۴۵-۵۵ دقیقه رخ داد. تغییرات جزئی دما بر فعالیت فوتوکاتالیستی تأثیر نمی گذارد [۴۵]. در ابتدای آزمایش ها، مکان های زیادی روی سطح کاتالیزور وجود داشت، پس از چند دقیقه، مکان های فعال کاهش یافت تا اینکه سرعت تخریب به سطح تقریباً پایدار رسید [۴۹]. در برهمکنش بین زمان و دما، همانطور که در شکل ۱ (c) نشان داده شده است، افزایش زمان واکنش باعث کاهش سطح پیک و افزایش راندمان تخریب وانکومایسین شد. زمان کمتر از ۳۰ دقیقه بر تجزیه وانکومایسین تأثیری ندارد.

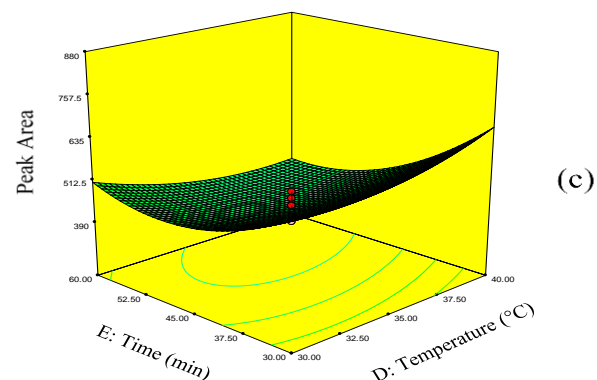
Actual Factors
 B: Init Conc Vanco = 45.00 mg/L
 D: Temperature = 35.00 °C
 E: Time (min) = 45.00 min



Actual Factors
 A: pH = 7.00
 B: Init Conc Vanco = 45.00 mg/L
 E: Time = 45.00 min



Actual Factors
 A: pH = 7.00
 B: Init Conc Vanco = 45.00 mg/L
 C: TiO₂ - clinoptilolite (mg) in 250 mL of reactor



تخریب وانکومایسین در شرایط بهینه

پس از انتخاب بهترین پارامترها و طرح، شرایط بهینه برای تجزیه وانکومایسین به شرح زیر تعیین شد: pH معادل ۵، غلظت اولیه وانکومایسین ۳۰ میلی‌گرم در لیتر، کاتالیست TiO₂-کلینوپتیلولیت ۵۰/۲۴ میلی‌گرم در راکتور ۲۵۰ میلی‌لیتری، دمای ۳۲/۲۴ درجه سانتی‌گراد و زمان واکنش ۵۰،۹ دقیقه که در این شرایط بهینه، تخریب وانکومایسین برابر با ۹۷ درصد بود.

نتیجه گیری

RSM یک روش آماری مناسب برای بهینه‌سازی آزمایش‌های حذف وانکومایسین است. این روش امکان مطالعه اثرات متغیرها بر کارایی فرآیند را با استفاده از حداقل تعداد آزمون فراهم کرد. شرایط بهینه برای تجزیه وانکومایسین توسط TiO₂-کلینوپتیلولیت/UV به شرح زیر است: pH معادل ۵، غلظت اولیه وانکومایسین ۳۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان کاتالیست ۵۰/۲۴ میلی‌گرم در راکتور ۲۵۰ میلی‌لیتری، دمای ۳۲/۲۴ درجه سانتی‌گراد و زمان واکنش ۵۰/۹ دقیقه. تحت این شرایط، راندمان

تخریب و نکومایسین ۹۷٪ بود. نتایج نشان داد که استفاده از TiO_2 – کلینوپتیلولیت کارایی خوبی در تجزیه و انکومایسین در محیط های آبی دارد.